

ENCLOSURE B

第2節 増反射膜

はじめに

基板に高屈折率 n_H と低屈折率 n_L の誘電体薄膜を、各々、光学膜厚 $nd = \lambda/4$ だけ交互に成膜すれば $((HL)^S$: S は繰返し数)、 λ_0 を中心とした不透過帯 (反射帯) の幅 (長波長端 λ_1 、短波長端 λ_2) が次式で計算されるミラーが作製できる¹⁾。

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left| \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right| \approx \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left| \frac{n_H/n_L - 1}{n_H/n_L + 1} \right| \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \lambda_0 / (1 - \Delta g), \quad \lambda_2 = \lambda_0 / (1 + \Delta g) \quad (2)$$

例えば、 TiO_2 (H) と SiO_2 (L) を使用して可視全域を 90% 以上反射させたい場合は、中心波長をずらした 3-4 個の $(HL)^S$ を組み合わせれば達成できる ($S \approx 7 \sim 10$)。一般に、カメラ、各種光学測定器やコピー機のミラーでは、広い波長域にわたって高い反射率が要求されるので、誘電体薄膜では 20-40 層くらいは必要になってしまふ。このようなミラーでは、一般に金属膜が利用されており、さらに高い反射率が要求される場合は、金属膜の上に数層の誘電体薄膜を付加すればよい。金属膜や単元素半導体膜を利用したミラーを増反射膜と呼んでいる。本節では、一般に可視域で多く利用されている Ag および Al 増反射膜について解説する。

1. 光学定数 n, k

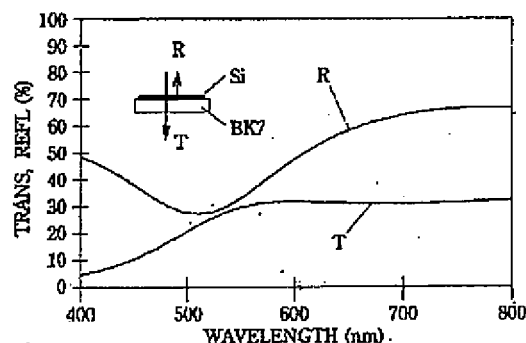
固体金属や半導体の波長分散データは、多くの書籍²⁾、³⁾ や文献に公表されているが、真空蒸着法やスパッタリング法により作製された薄膜の光学定数 ($n-k$) をまとめた資料は少ない。金属の不純物、成膜方法やその条件 (真空圧、基板温度や成膜レートなど) によりその値は大きく変化してしまうので、実際に使用している成膜装置で薄膜を作製・計測した光学定数データを利用して分光特性を設計すべきことは当然である。光学定数測定については、その理論 (F.Abeles⁴⁾, O.S.Heavens⁵⁾) や種々の測定器を利用したコンピューターによる解析 (J.B.Bennett⁶⁾, J.C.Manificier⁷⁾, J.A.Dobrowolski⁸⁾) が発表されており、J.M.Siqueiros 等⁹⁾ は金属 Rb 膜の分光反射率測定データから光学定数を計算する方法を提案している。ここでは、通常、筆者が行っている市販理論ソフトウェア¹⁰⁾ を利用した金属膜の測定方法を示す。

その手順を以下に示す。

- ①成膜 (膜厚 d は Ag : 40-50 nm, Al : 15-20 nm, Cr : 5-10 nm, Cu : 15-30 nm, Si : 50-60 nm 程度。透過率が 10% 以上)
- ②分光透過率および反射率測定 (反射率は膜面から測定、測定波長間隔は 1 nm)
- ③エリプソメーターなどにより膜厚 d 測定
- ④分光特性データを理論ソフトウェアのデータ形式に合うように変換 (自動変換ソフトウェア¹¹⁾ を利用すれば、表示データおよび最適設計の目標値を自動作成。アスキーデータの場合は EXCEL でも可能)
- ⑤消衰係数を考慮した適切な分散関数の初期係数を入力して最適設計を行い、係数を求める。しかし、初期値が適切な値でないと、最小二乗法による最適設計ではスタートしない。そのような場合は、以下の手順で求めるとよい。

- ⑥膜厚 d を入力してから、各波長毎に測定透過率および反射率に一致するまで n および k を変化させる。

筆者が行った真空蒸着法による単元素半導体 Si 薄膜 ($d = 53 \text{ nm}$) の⑤による自動フィッティングの様子を図 1 に示す。図 (a) は測定データを平均化処理した分光

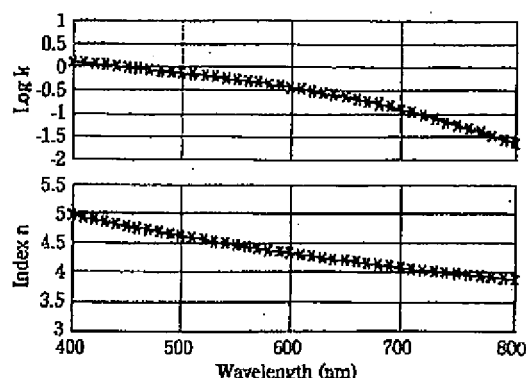


(a) Si 膜の分光特性



(b) 自動フィッティング画面

図 1 Si 膜の光学定数の自動フィッティング

図2 Si膜の波長分散 (基板温度 $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

分散式: QUADSK

 $n = A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2$, $k = D + E \cdot \lambda + F \cdot \lambda^2$, $\lambda: [\text{nm}]$ $A = 6.887743$, $B = -0.0058406$, $C = 2.59918\text{E}-6$, $D = 4.594326$, $E = -0.0110905$, $F = 6.720731\text{E}-6$

特性である。図(b)のように基材、薄膜の膜厚、光学定数の初期値(おおよその値)を入力すると、図(b)中の画面のように波長毎に測定値に合うように光学定数のフィッティングが開始する。その結果を図2に示す(計算は1 nm 間隔だが、表示は10 nm 間隔)。なお、Si薄膜の場合は、分散関数 QUADSK^{16, 17)}を使用すると④の方法でも求まり、⑤による計算とはほぼ一致した。金属膜の場合も同様にして求まる。参考のため、本データや文献などから補間処理した各種金属・単元素半導体の光学定数を表1に示す。

これらの吸収物質を基板にコーティング場合の反射率 R は

$$R = \frac{(1-n)^2 + k^2}{(1+n)^2 + k^2} \quad (3)$$

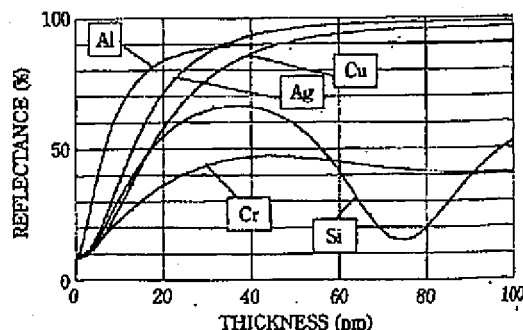
で得られ、基板の屈折率を $n_s = 1.52$ とした時の $\lambda_0 = 633\text{ nm}$ の光に対する膜厚と反射率の関係を図3に示す。Alは膜厚 $d = 40\text{ nm}$ 以上、Ag, Cuは $d = 80\text{ nm}$ 以上あれば、それらの反射率は飽和することがわかる。実際には薄膜の表面散乱のために、計算値よりも反射率は2~3%程度は低くなってしまうことが多く、また膜強度を考慮してAlでは $d = 80 \sim 100\text{ nm}$ 成膜されることが多い。

2. Ag 増反射膜

可視域用ミラーとして利用される金属中でAgは可視域で最も吸収が少なく、しかも高い反射率が得られ、MoやWボートで容易に室温蒸着できることもあり最も

表1 金属・単元素半導体膜の光学定数

波長 [nm]	Ag(室温) ¹⁾ n	Ag(室温) ¹⁾ k	Al(室温) ²⁾ n	Al(室温) ²⁾ k	Cr(室温) ²⁾ n	Cr(室温) ²⁾ k	Cu(室温) ³⁾ n	Cu(室温) ³⁾ k	Si(300 °C) n	Si(300 °C) k
400	0.070	1.921	0.390	4.437	2.451	1.789	0.843	1.997	4.967	1.233
410	0.068	2.019	0.412	4.547	2.471	1.809	0.847	2.053	4.930	1.177
420	0.063	2.117	0.434	4.657	2.490	1.830	0.851	2.109	4.893	1.122
430	0.059	2.215	0.457	4.768	2.508	1.850	0.857	2.149	4.857	1.068
440	0.055	2.313	0.479	4.878	2.524	1.870	0.865	2.173	4.821	1.016
450	0.051	2.411	0.501	4.988	2.540	1.890	0.873	2.197	4.786	0.966
460	0.051	2.501	0.523	5.099	2.560	1.914	0.881	2.237	4.751	0.915
470	0.050	2.591	0.546	5.189	2.579	1.939	0.889	2.277	4.717	0.866
480	0.049	2.681	0.568	5.289	2.601	1.957	0.891	2.319	4.683	0.819
490	0.048	2.771	0.590	5.389	2.625	1.969	0.887	2.363	4.650	0.774
500	0.047	2.861	0.612	5.490	2.649	1.981	0.883	2.407	4.617	0.729
510	0.048	2.951	0.631	5.581	2.672	1.989	0.867	2.411	4.585	0.686
520	0.049	3.041	0.691	5.673	2.696	1.998	0.851	2.415	4.553	0.645
530	0.051	3.131	0.730	5.765	2.720	2.006	0.817	2.417	4.522	0.604
540	0.052	3.221	0.769	5.856	2.744	2.014	0.765	2.417	4.492	0.566
550	0.053	3.312	0.809	5.963	2.768	2.022	0.712	2.417	4.462	0.528
560	0.054	3.398	0.850	6.091	2.800	2.031	0.584	2.488	4.432	0.491
570	0.055	3.484	0.891	6.219	2.831	2.039	0.456	2.559	4.403	0.456
580	0.056	3.570	0.927	6.332	2.867	2.045	0.346	2.690	4.375	0.423
590	0.057	3.656	0.945	6.322	2.907	2.049	0.255	2.882	4.347	0.390
600	0.058	3.742	0.963	6.322	2.947	2.053	0.163	3.073	4.319	0.359
610	0.060	3.832	1.017	6.377	2.971	2.065	0.144	3.200	4.292	0.330
620	0.062	3.922	1.071	6.431	2.995	2.078	0.124	3.328	4.266	0.302
630	0.064	4.013	1.125	6.485	3.025	2.088	0.114	3.442	4.240	0.275
633	0.065	4.040	1.142	6.502	3.036	2.090	0.115	3.472	4.232	0.267
640	0.067	4.103	1.179	6.540	3.061	2.096	0.115	3.542	4.214	0.249
650	0.069	4.193	1.234	6.594	3.097	2.104	0.115	3.642	4.190	0.225
660	0.070	4.273	1.306	6.674	3.137	2.108	0.115	3.742	4.165	0.202
670	0.071	4.353	1.378	6.755	3.177	2.112	0.115	3.842	4.141	0.181
680	0.072	4.433	1.450	6.835	3.219	2.114	0.115	3.932	4.118	0.160
690	0.073	4.513	1.522	6.915	3.263	2.114	0.115	4.012	4.095	0.142
700	0.074	4.593	1.594	6.995	3.307	2.114	0.116	4.092	4.073	0.124
710	0.075	4.683	1.634	7.020					4.051	0.108
720	0.076	4.774	1.674	7.044					4.030	0.093
730	0.077	4.864	1.715	7.068					4.009	0.080
740	0.078	4.954	1.755	7.092					3.989	0.068
750	0.079	5.044	1.795	7.116					3.969	0.057
760	0.081	5.124	1.833	7.163					3.950	0.047
770	0.083	5.204	1.871	7.089					3.932	0.039
780	0.085	5.284	1.909	7.075					3.913	0.033
790	0.087	5.364	1.947	7.061					3.896	0.027
800	0.089	5.444	1.985	7.047					3.879	0.023

図3 金属膜の膜厚と反射率の関係 ($\theta = 0^{\circ}$, $\lambda = 633\text{ nm}$)

生産現場における光学薄膜の設計・作製・評価技術

2001年1月22日 第1刷発行

定価85,000円＋税

発行人 高 澤 一 弘

発行所 株式会社 技 術 情 報 協 会

〒141-0031 東京都品川区西五反田2-25-2

飯嶋ビル6F

TEL 03(5436)7744 FAX 03(5436)7745

<http://www.gijutu.co.jp/>

印刷・製本 日本印刷株式会社

ISBN4-906317-25-1 C3058

Partial Translation:

Chapter 2 High Reflection Layer

1. Optical Constants n , k

Chromatic dispersion data of a solid metal or a semiconductor have been disclosed by numerous printed books and documents. However, there are not so many documents disclosing optical constants of a thin layer formed by a vapor deposition process or a sputtering process. Since the values of optical constants of a thin layer greatly differ depending upon impurities contained in the metal, a film forming process or other conditions (a vacuum pressure, the temperature of a substrate, a film forming rate and the like), it is natural that spectrum characteristics of a thin film should be designed using optical constant data obtained by forming the thin layer by a film forming apparatus to be actually used and measuring optical constants of the thus formed thin film.

**Technique for Designing, Forming and Estimating Optical thin films
at a Production Site**

First Copy published on January 22, 2001

Price 85,000 yen plus tax

Author: Kazuhiro TAKAHASHI

Publisher: Technical Information Association